

УДК 534.222.2

ТЕМПЕРАТУРА ДЕТОНАЦИИ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА С ПОЛИМЕРНЫМ СЕНСИБИЛИЗАТОРОМ

С. А. Бордзиловский^{1,2}, С. М. Караханов¹, А. В. Пластинин¹,
С. И. Рафейчик¹, А. С. Юношев^{1,2}

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, karakhanov@hydro.nsc.ru

²Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Пирометрическим методом определены зависимости яркостных температур детонационного фронта и продуктов детонации от детонационного давления в диапазоне $0.7 \div 9.4$ ГПа. Давление варьировалось при изменении начальной плотности эмульсионного взрывчатого вещества в диапазоне $0.43 \div 1.2$ г/см³. В качестве сенсibilизатора использованы полимерные микробаллоны. Обнаружен немонотонный характер зависимости яркостной температуры в плоскости Чепмена — Жуге от детонационного давления. В исследованном диапазоне давления измеренные значения температуры изменялись от 2250 до 1830 К. Проведен сравнительный анализ применения полимерных и стеклянных микробаллонов в качестве сенсibilизаторов. Полученные экспериментальные данные сопоставлены с имеющимся в литературе расчетом.

Ключевые слова: эмульсионное ВВ, температура детонации, микробаллоны, продукты детонации, полимерный сенсibilизатор.

DOI 10.15372/FGV20170615

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время эмульсионные взрывчатые вещества (ЭмВВ) широко применяются в горнодобывающей промышленности. Достоинства ЭмВВ, такие как простота их изготовления непосредственно на рабочем месте, безопасность транспортировки отдельных компонентов, возможность варьирования параметров детонации путем изменения только массы порообразующего компонента, вводимого в эмульсионную матрицу, хорошие экологические характеристики, привели к тому, что они становятся основным классом взрывчатых веществ, используемых в горном деле [1]. Известно, что ЭмВВ могут использоваться и в ряде других приложений [2]. Для прогнозирования результатов их использования необходимо детальное исследование различных характеристик ЭмВВ.

Для того чтобы эмульсионная матрица могла детонировать, в нее вводят сенсibilизатор, в качестве которого используются цено-

сферы, перлит, газовые пузырьки или микробаллоны из стекла и полимера. Наиболее перспективными, очевидно, являются стеклянные (СМБ) и полимерные (ПМБ) микробаллоны, которые обеспечивают достаточно однородные по размеру поры внутри эмульсии и позволяют легко регулировать плотность ЭмВВ. Поэтому ниже анализируются результаты работ только со стеклянными и полимерными микробаллонами.

В работах [3–5] проведены эксперименты с целью выяснить, каким образом добавка СМБ влияет на детонационные характеристики модельной смеси нитрометан — полиметилметакрилат (ПММА). Результаты показали, что изменение концентрации микробаллонов сильно меняет давление и скорость детонации смеси [3]. Концентрация и гранулометрический размер СМБ влияют также на ударную чувствительность и критический диаметр детонации [4]. Авторы [5] провели численное моделирование процесса возникновения горячих точек (ГТ) при коллапсе СМБ с акцентом на вязкопластический механизм разогрева [6]. В расчете учитывались толщина стенки микробаллона, его размер и вязкость стекла и жидкости, в которой он находится. Моделирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-03-00883).

© Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Пластинин А. В., Рафейчик С. И., Юношев А. С., 2017.

показало, что инициирование исследуемого ВВ (нитрометан — ПММА) при определенной длительности ударной волны зависит в основном от диаметра, толщины стенки и массовой доли СМБ.

Изучению зависимостей давления, скорости и критического диаметра детонации от массового содержания и размера микробаллонов в составе ЭМВВ на основе аммиачной селитры или смеси аммиачной и натриевой селитры (ниже АС/НС) посвящено большое количество работ. Определение ударной адиабаты не реагирующей эмульсии при плотности 1.248 г/см^3 , измерение расстояния до детонации, скорости детонации и критического диаметра проведены в [7]. Детонационные свойства состава ЭМВВ со стеклянными микробаллонами (ЭМВВ/СМБ) различного размера исследованы в работе [8]. Было показано, что чем выше плотность микробаллонов в заряде, тем меньше его критический диаметр, при этом критический диаметр детонации эффективно уменьшают микробаллоны диаметром меньше 45 мкм. В работе [9] определено соотношение между критическим диаметром и критической толщиной ЭМВВ на основе смеси АС/НС, оно составило $2.4 \div 2.5$ при массовой концентрации СМБ 8 %.

В работах [10, 11] исследовались низкоскоростные ЭМВВ на предмет возможного их использования в приложениях, где необходимо уменьшить нагрузку на обрабатываемые взрывом материалы. Было показано, что композиции плотностью менее 1 г/см^3 со скоростью детонации $2 \div 3.5 \text{ км/с}$ отличаются слабой зависимостью скорости детонации от диаметра цилиндрического или от толщины плоского заряда ВВ. Критический диаметр малоплотного ЭМВВ в металлической оболочке составил 1.7 мм, что более чем в семь раз меньше критического диаметра открытого заряда.

В [12] подробно исследованы зависимости ширины зоны реакции и критического диаметра от плотности ЭМВВ. Экспериментальные данные показали, что качественная корреляция между этими зависимостями отсутствует: ширина зоны реакции монотонно растет при увеличении плотности ЭМВВ, а критический диаметр характеризуется U-образной зависимостью.

Из параметров, характеризующих ЭМВВ, меньше всего данных имеется по температуре продуктов детонации. В то же время зна-

ние изменения температуры во времени необходимо для понимания процесса инициирования ЭМВВ и построения уравнения состояния продуктов детонации. По этому вопросу в литературе представлены лишь расчеты [13] и немногочисленные экспериментальные данные [14]. В работе [15] рассмотрена структура сигнала излучения, регистрируемого оптическим пирометром, при детонации состава ЭМВВ/СМБ. Анализ показал, что точку на профиле светимости, по значению которой рассчитывается температура детонации, необходимо выбирать, привязывая ее к положению плоскости Чепмена — Жуге (ЧЖ) на профиле массовой скорости или давления. Была определена зависимость температуры продуктов детонации ЭМВВ на основе смеси аммиачной и натриевой селитры с СМБ от давления ЧЖ.

Данных о характеристиках ЭМВВ, в которых в качестве сенсibilизатора используются полимерные микробаллоны, в литературе мало [16, 17]. Однако именно эти микробаллоны особенно интересны в качестве сенсibilизатора, поскольку толщина их оболочки всего лишь 0.1 мкм и внутри они содержат газ изобутан, который так же, как и материал оболочки, может дополнительно выделять энергию за счет окисления продуктами реакции. Это принципиально отличает полимерные микробаллоны от стеклянных, инертная оболочка которых является балластом при разрушении в детонационной волне. Отличие физических характеристик СМБ и ПМБ приводит к изменению параметров детонации ЭМВВ на их основе [18]. Можно ожидать, что по-разному будет вести себя и температура, поэтому цель настоящей работы — определение зависимости температур детонационного фронта и продуктов детонации от давления (плотности) при использовании полимерных микробаллонов в качестве сенсibilизатора.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты проведены с высокодисперсной эмульсионной матрицей следующего состава: 94 % (масс.) окислителя — водного раствора аммиачной и натриевой селитры; 6 % горючего — смеси углеводородов: индустриального масла, парафина и эмульгатора (АС/НС-эмульсия). Сенсibilизатор — полимерные микробаллоны Expancel 461 DET 40 d25 с насыпной плотностью 0.025 г/см^3 и характерным размером 40 мкм.

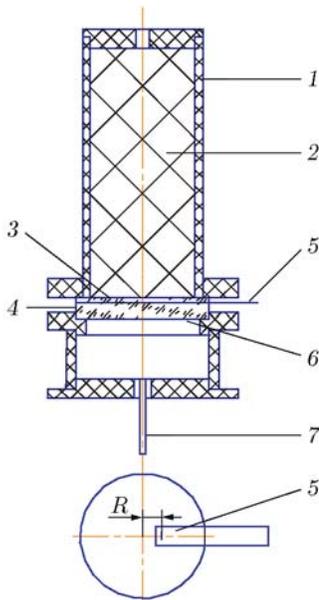


Рис. 1. Схема экспериментов:

1 — труба из полипропилена, 2 — ЭМВВ/ПМБ, 3 — окно из ПММА толщиной 2 мм, 4 — блок из ПММА толщиной 10 мм, 5 — тонкопленочный датчик давления (пьезоэлектрический или манганиновый), 6 — маска с апертурой диаметром 6.3 мм, 7 — пучок световодов

Плотность ЭМВВ варьировали в пределах $\rho_0 = 0.43 \div 1.2 \text{ г/см}^3$ путем изменения количества микробаллонов $\mu = 4 \div 0.3 \%$ сверх массы эмульсии. Диаметр испытуемых зарядов 57 мм, длина 155 мм. Оболочкой зарядов служили трубы из полипропилена с толщиной стенки 3 мм. Трубу заполняли сразу после приготовления ЭМВВ.

Для регистрации излучения использовалась методика «оптического окна» (рис. 1). При монтаже экспериментальной сборки контролировали отсутствие воздушных полостей на поверхности контакта ЭМВВ — ПММА. Излучение детонационного фронта при помощи оптоволокон (сердцевина $\varnothing 0.4 \text{ мм}$ из кварца, длина $8 \div 15 \text{ м}$) выводилось из взрывной камеры и поступало на вход 4-канального пирометра. В качестве детекторов излучения применяли фотоумножители со спектральной чувствительностью в оптическом диапазоне длин волн. В измерительных каналах между торцами световодов и фотоумножителями устанавливали светофильтры, выбор которых определялся предполагаемыми значениями регистрируемой температуры. Для измерения относительно невысокой температуры детонации

ЭМВВ в основном использовали интерференционный фильтр на линии $\lambda = 630 \text{ (20) нм}$ и, в целях повышения отношения сигнал/шум, широкополосный светофильтр на длине волны 660 (120) нм (в скобках — полоса пропускания фильтра). Разница температур, рассчитываемых при использовании различных светофильтров, не превышала $50 \div 70 \text{ К}$ и находилась в пределах ошибки измерений. Данные, полученные в одном опыте по разным каналам, осреднялись. Детальное описание пирометра, техника калибровки и методика расчета температуры по амплитуде сигнала светимости приведены в [19]. Временное разрешение пирометра составляло 25 нс. При обработке пирометрических сигналов использовалось приближение черного тела, т. е. определялась яркостная температура T_b детонационного фронта или продуктов детонации ЭМВВ.

В каждом опыте одновременно с излучением регистрировали профиль давления на границе раздела ЭМВВ — ПММА. Торцы заряда закрывали пластиной из ПММА толщиной 2 мм, предохраняющей датчик от действия продуктов детонации. Между этой пластиной и блоком ПММА толщиной 10 мм на расстоянии 5 мм от центра заряда устанавливали чувствительный элемент либо тонкопленочного пьезоэлектрического датчика (Dynasen PVF₂ 11-.04-ЕК), либо манганинового датчика, который и регистрировал профиль давления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Примеры профилей давления, зарегистрированные в исследованном диапазоне плотностей ЭМВВ, показаны на рис. 2. На профилях заметен, особенно при высокой плотности ЭМВВ (см. рис. 2), слабый подъем длительностью $\approx 0.25 \text{ мкс}$, предшествующий основному фронту, который, по нашему мнению, связан с ударной поляризацией верхней пластины из ПММА толщиной 2 мм. По мере уменьшения плотности ЭМВВ и, следовательно, давления подъем практически исчезает.

Для проверки этого предположения поставлен эксперимент, в котором защитная пластина из ПММА (см. 3 на рис. 1) заменена фторопластовой толщиной 0.45 мм, а блок ПММА (см. 4 на рис. 1) — пластиной из фторопласта толщиной 8 мм. Между фторопластовыми пластинами были размещены два датчика давления — манганиновый и пьезоэлектрический,

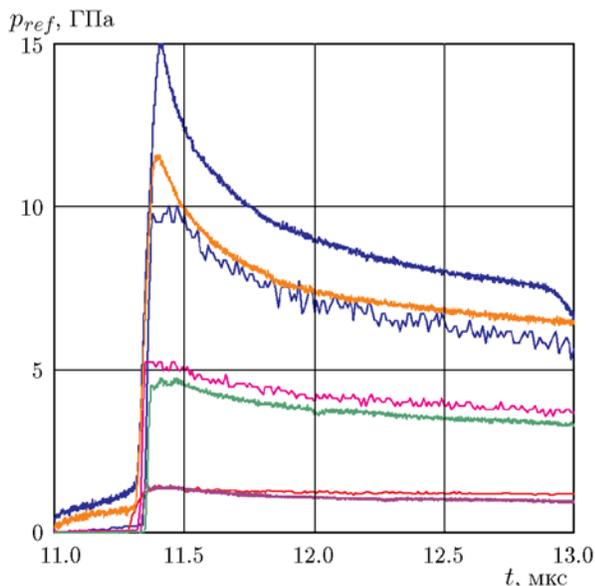


Рис. 2. Профили давления при детонации ЭМВВ, sensibilizированного полимерными микробаллонами, соответствующие начальным плотностям заряда $\rho_0 = 1.2; 1.1; 1.0; 0.83; 0.82; 0.51; 0.43 \text{ г/см}^3$ (сверху вниз)

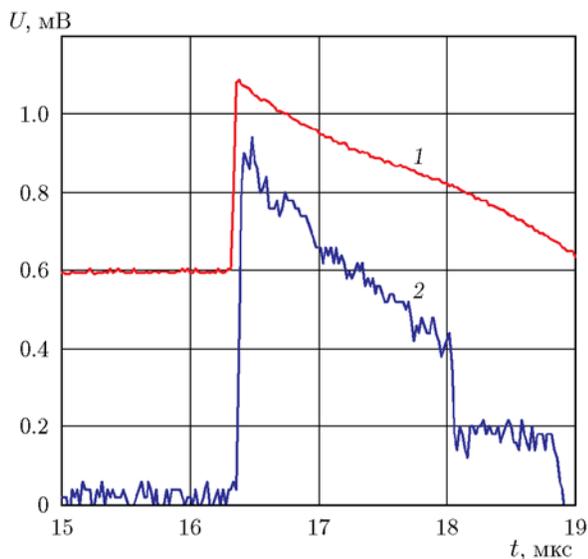


Рис. 3. Осциллограммы, регистрируемые пьезоэлектрическим (1) и марганцевым (2) датчиками

которые в одном эксперименте регистрировали профиль давления от детонационной волны, выходящей из ЭМВВ плотностью 1.3 г/см^3 (рис. 3). Как видно из полученных профилей, подъем давления перед основным фронтом отсутствует, что подтверждает предположение о

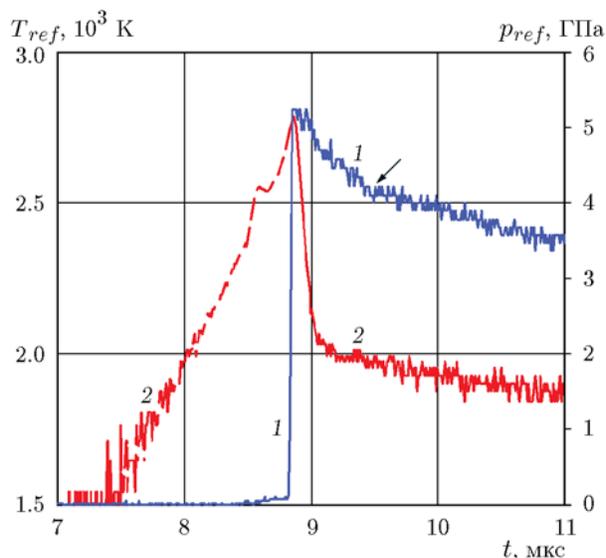


Рис. 4. Профили давления (1) и температуры (2). Пьезоэлектрический датчик давления ($\rho_0 = 0.83 \text{ г/см}^3$, $\Delta t = 0.2 \text{ мкс}$, $\tau = 0.69 \text{ мкс}$)

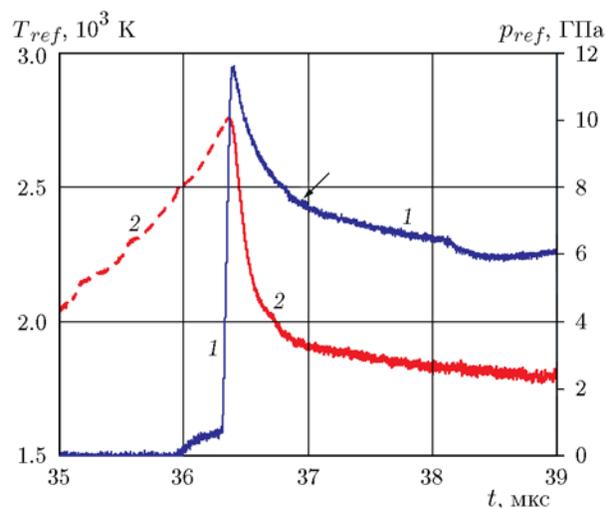


Рис. 5. Профили давления (1) и температуры (2). Марганцевый датчик давления ($\rho_0 = 1.1 \text{ г/см}^3$, $\Delta t = 0.5 \text{ мкс}$, $\tau = 0.64 \text{ мкс}$)

его связи с ударной поляризацией пластины из ПММА.

На рис. 4, 5 показаны профили давления и температуры при различной начальной плотности ЭМВВ. Для корректного сопоставления профиль давления был сдвинут относительно профиля светимости вперед на время прохождения ударной волны по защитной плексигласовой пластине ($0.3 \div 0.6 \text{ мкс}$ в зависимости от давления ударной волны), так что перед-

ний фронт профиля давления совпадал с максимумом профиля светимости. По зарегистрированному профилю светимости проводился расчет температуры в соответствии с калибровкой тракта регистрации.

При распространении детонации по частично прозрачному заряду свет, излучаемый детонационной волной, поглощается слоем несжатого вещества, расположенного между фронтом волны и поверхностью раздела ЭмВВ — ПММА, согласно закону Бугера — Ламберта — Бера и светимость нарастает до выхода детонационной волны на эту границу. Поэтому на рис. 4 и 5 левые ветви температурных профилей показаны штриховыми линиями, поскольку из-за поглощения излучения они не соответствуют температуре фронта детонационной волны.

В [15] установлено, что регистрируемый профиль является результатом двух процессов. Первый — формирование горячих точек вблизи границы раздела ЭмВВ — ПММА. Второй связан с ростом температуры внутри зоны реакции по мере увеличения степени взрывного разложения композита. Как показали исследования [20], время разгорания ГТ при коллапсе полимерных микробаллонов даже при давлении 1.6 ГПа составляет всего лишь 20 нс. Поэтому яркость излучения достигает максимума в момент выхода ударной волны на границу с окном. Пиковое значение светимости позволяет оценить яркостную температуру ГТ при условии, что концентрация микробаллонов в ЭмВВ достаточно высокая для того, чтобы сформировать оптически толстый излучающий слой.

На профилях сигналов светимости можно выделить две фазы спада амплитуды — быструю и медленную. Длительность фазы быстрого спада (Δt), по-видимому, определяется процессом охлаждения ГТ в результате турбулентного перемешивания окружающей среды. Сопоставлять сигнал, регистрируемый пирометром, с температурой продуктов детонации можно лишь начиная с момента, когда у оптического окна появляются горячие продукты.

Температуру продуктов детонации рассчитывали по амплитуде сигнала светимости в точке, соответствующей по времени плоскости ЧЖ на профилях давления. Чтобы выделить эту точку, профили давления сглаживали и в ряде случаев дифференцировали, таким образом определяли точку, в которой изменялась скорость спада давления. В результате значе-

ние времени реакции составило 0.85 ± 0.20 мкс в зависимости от плотности ЭмВВ. Эти данные соответствуют результатам работы [12], в которой путем анализа профилей давления и массовой скорости определялось время реакции ЭмВВ, сенсibilизированного стеклянными микробаллонами. Было показано, что на профилях можно выделить две точки, которые можно связать с концом реакции в ЭмВВ: первая соответствует времени $0.2 \div 0.3$ мкс, вторая — $0.6 \div 0.7$ мкс. Дальнейший анализ, проведенный в работе [12], показал, что в качестве времени реакции следует принять вторую точку ($0.6 \div 0.7$ мкс).

Положение точек на профилях давления, выбранных для оценки температуры продуктов детонации, указано на рис. 4, 5 стрелками, которые отмечают интервал времени между фронтом ударной волны, приходящей на датчик давления, и предполагаемой плоскостью ЧЖ (τ). При этом полагается, что профиль детонационной волны не искажается после ее прохождения по защитной пластине из ПММА.

Для того чтобы убедиться, что интенсивность излучения определяется именно продуктами детонации, необходимо определить, каков вклад излучения от остывающих ГТ в регистрируемый сигнал к моменту завершения реакции и достижения давления ЧЖ. Такую оценку можно сделать на основании результатов работы [21], в которой проводились опыты по сжатию СМБ в инертной матрице (образцы: эпоксидная смола + СМБ). При выходе ударной волны на границу образец — ПММА сигнал спектральной яркости спадал в течение 0.25 мкс до уровня шумов ФЭУ. Поскольку в настоящей работе яркостная температура измеряется позднее $0.6 \div 0.7$ мкс, а спектральная яркость к этому времени имеет заметную амплитуду, то вкладом остывающих ГТ после окончания реакции можно пренебречь и считать, что регистрируемая амплитуда сигнала полностью определяется тепловым излучением продуктов детонации.

При плотности ЭмВВ менее 1.1 г/см^3 или давлении детонации менее 6.2 ГПа после взаимодействия детонационной волны с окном из ПММА в продуктах детонации образуется волна сжатия. За этой волной температура продуктов детонации увеличивается. При давлении более 6.2 ГПа в продуктах детонации генерируется волна разрежения и температура уменьшается. Оценить влияние взаимодей-

Параметры детонации состава ЭмВВ/ПМБ

№ п/п	ρ_0 , г/см ³	τ , мкс	p_{ref} , ГПа	p_d , ГПа	T_{hs} , 10 ³ К	T_{ref} , 10 ³ К	T_b ($G = 0.4$), 10 ³ К
1	0.43	1.09	1.1	0.7	2.80	2.25	2.08
2	0.51	0.94	1.3	0.95	2.95	2.32	2.18
3	0.82	0.83	4.0	3.65	2.77	2.3	2.26
4	0.83	0.69	4.2	3.8	2.77	1.97	1.94
5	1.00	0.66	7.0	6.5	2.70	2.13	2.11
6	1.10	0.64	7.4	7.9	2.76	1.9	1.92
7	1.20	1.20	7.9	9.4	2.74	1.85	1.88
8	1.20	0.80	8.0	9.4	2.70	1.8	1.83

Примечание. p_{ref} — давление в волне, отраженной от ПММА; p_d — давление ЧЖ с учетом поправки на отражение при $G = 0.4$; T_{hs} — температура ГТ.

ствия детонационной волны с пластиной из ПММА на измеряемую температуру, можно в предположении, что продукты реакции описываются моделью совершенного газа и их конечное состояние несильно отличается от состояния в точке ЧЖ. Тогда разгрузку и ударное сжатие продуктов реакции можно описать изэнтропией с постоянным показателем (§ 5.6 в [22]), и при этом температуры связаны соотношением [23]

$$T = T_{CJ}(V_{CJ}/V)^G,$$

где T_{CJ} — температура в точке ЧЖ, V_{CJ} и V — удельные объемы соответственно в точке ЧЖ и на ударной адиабате (адиабате разгрузки) продуктов реакции, G — коэффициент Грюнайзена.

Экспериментальные данные по температуре состава ЭмВВ/ПМБ в отраженной от окна волне (T_{ref}) и по температуре падающей волны (T_b), которая рассчитывалась с учетом приведенной выше поправки при $G = 0.4$, представлены в таблице и на рис. 6. Инструментальная ошибка определения давления — 5 %, а определения температуры — 8 %. На рис. 6 нанесены также данные по температуре падающей волны в ЭмВВ/СМБ, измеренные в [15]. Следует отметить различный ход этих кривых: если для ЭмВВ/СМБ данные по зависимости температуры от давления детонации приближаются полиномом $T_b = 1888 + 91.6p_d - 7.4p_d^2$ и имеют выраженный максимум при $p_d \approx 6$ ГПа ($\rho_0 = 1.1$ г/см³), то зависимость для состава ЭмВВ/ПМБ также немонотонна, однако максимум при $p_d = 2.3$ ГПа ($\rho_0 = 0.65$ г/см³)

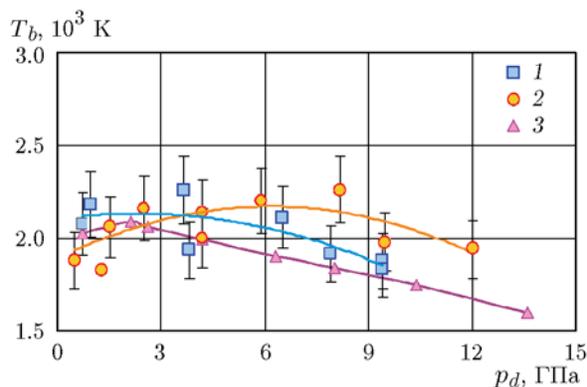


Рис. 6. Зависимость яркостной температуры от давления в плоскости ЧЖ в ЭмВВ с разными типами сенсibilизаторов:

1 — состав ЭмВВ/ПМБ; 2 — состав ЭмВВ/СМБ [15]; 3 — расчет [13], точка при $p_d = 13.6$ ГПа соответствует ЭмВВ без пор

слабо выражен и совпадает с максимумом на расчетной кривой [13]. Температура в точке ЧЖ, определенная для ЭмВВ/ПМБ, монотонно снижается с повышением давления, и данные хорошо аппроксимируются функцией $T_b = 2105 + 25.7p_d - 5.6p_d^2$.

В области низких давлений регистрируемая яркостная температура ЭмВВ/ПМБ выше по сравнению с ЭмВВ/СМБ на 15 % при $p_d = 1$ ГПа. Это, очевидно, связано с тем, что, как уже отмечалось выше, на нагрев и разгон инертного вещества разрушенных стеклянных микробаллонов требуется значительная энергия, отбираемая от продуктов детонации. Как следствие этого отбора, понижается темпера-

тура продуктов реакции.

На рис. 6 приведены также результаты расчета температуры ЭМВВ с использованием уравнения состояния [13]. Как уже указывалось в [15], расчет по этому уравнению лучше всего соответствовал данным для ЭМВВ со стеклянными микробаллонами. Для ЭМВВ с полимерными микробаллонами (см. рис. 6) расчет по этому же уравнению состояния хорошо отражает как ход экспериментальной зависимости, так и измеренные абсолютные значения температуры. Этот результат — следствие того, что полимерные микробаллоны идеально моделируют поры внутри эмульсионной матрицы.

Кроме температуры детонации, в работе регистрировали температуру детонационного фронта, соответствующую температуре ГТ, генерируемых при коллапсе микробаллонов. Значения температуры определяли по максимумам регистрируемых профилей излучения. На рис. 7 представлены экспериментальные данные для ЭМВВ/ПМБ (кривая 2) и полученные в [15] для ЭМВВ/СМБ (кривая 1). Температура ГТ в ЭМВВ/ПМБ превышает температуру детонации в среднем на 700 К в исследованном диапазоне начальных плотностей ЭМВВ. Ранее в [15] значительное превышение температуры ГТ над температурой детонации было зарегистрировано и для ЭМВВ/СМБ. Сопоставление зависимостей на рис. 7 показывает их различное поведение. В то время как температура ГТ в ЭМВВ/ПМБ слабо падает с ро-

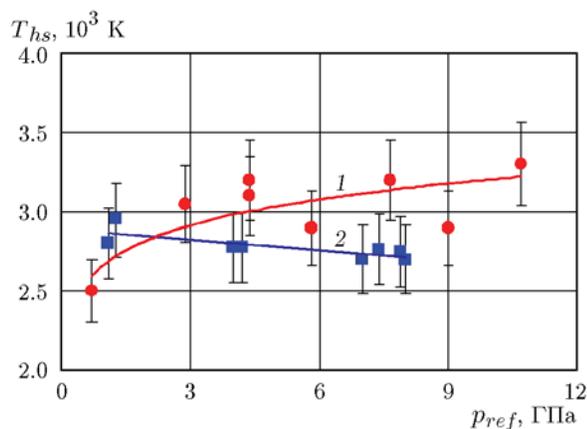


Рис. 7. Зависимость яркостной температуры горячих точек от давления в ЭМВВ с разными типами сенсibilизаторов:

1 — состав ЭМВВ/СМБ, 2 — состав ЭМВВ/ПМБ [15]

стом давления (кривая 2) и хорошо приближается линейной функцией $T_{hs} = 2886 - 21.6p_{ref}$, температура ГТ в ЭМВВ/СМБ по мере повышения плотности взрывчатых веществ растет от 2500 до 3300 К (кривая 1). Различие температур в зависимости от использования СМБ или ПМБ особенно заметно при начальной плотности ЭМВВ 1 г/см^3 ($p_{ref} = 7 \text{ ГПа}$) и выше. Одна из возможных причин заключается в том, что при коллапсе полимерных и стеклянных микробаллонов возникают ГТ с различной температурой, которая определяется механизмом сжатия. Подтверждением такого предположения могут служить результаты работы [24], в которой численно моделировался процесс коллапса поры и стеклянного микробаллона в ЭМВВ. Расчет показал, что при сжатии стеклянного микробаллона возникает более высокая температура, чем при сжатии поры, из-за удара образующейся кумулятивной струи по стенке микробаллона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены измерения яркостной температуры детонационного фронта и продуктов детонации эмульсионного взрывчатого вещества на основе смеси аммиачной и натриевой селитр на границе ЭМВВ — окно из ПММА. В качестве сенсibilизатора использованы полимерные микробаллоны. Варьирование концентрации микробаллонов от 4 до 0.3 % сверх массы эмульсии изменяло плотность ЭМВВ в диапазоне $0.43 \div 1.2 \text{ г/см}^3$ и, соответственно, давление детонации в диапазоне $0.7 \div 9.4 \text{ ГПа}$. Одновременно с измерением температуры регистрировались профили давления для определения положения плоскости Чепмена — Жуге, в соответствии с которым определялась температура продуктов детонации. Наблюдается немонотонная зависимость температуры от давления: максимальная температура 2250 К достигалась при $p_d = 2.3 \text{ ГПа}$ ($\rho_0 = 0.65 \text{ г/см}^3$). С дальнейшим ростом плотности ЭМВВ температура уменьшалась до 1830 К при $p_d = 9.4 \text{ ГПа}$ ($\rho_0 = 1.2 \text{ г/см}^3$). Сопоставление полученных данных с результатами работы [15], в которой роль сенсibilизатора ЭМВВ играли стеклянные микробаллоны, показало, что в области низких плотностей ЭМВВ температура продуктов в ЭМВВ с полимерными микробаллонами заметно выше, чем со стеклянными. Такое различие можно объяснить отсутствием потерь энергии на нагрев и разгон

инертного вещества разрушенных стеклянных микробаллонов.

Температура горячих точек при выходе ударной волны на границу с окном, которая определялась по максимуму профиля излучения, в ЭМВВ с полимерными баллонами превышает температуру детонации в среднем на 700 К в исследованном диапазоне давления. Сопоставление зависимостей температуры детонационного фронта при использовании полимерных микробаллонов в данной работе и стеклянных в [15] показало их различное поведение: температура фронта в ЭМВВ с полимерными микробаллонами слабо падает с ростом давления, а в ЭМВВ со стеклянными микробаллонами по мере повышения плотности взрывчатых веществ она растет от 2500 до 3300 К. Этот факт, по-видимому, следствие разного механизма формирования горячих точек в этих случаях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колганов Е. В., Соснин В. А. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. Кн. 1: Составы и свойства. — Дзержинск: ГосНИИ «Кристалл», 2009.
2. Юношев А. С., Рафейчик С. И., Пластинин А. В., Сильвестров В. В. Новые приложения эмульсионных взрывчатых композиций // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 2. — С. 113–118.
3. Presles H.-N., Campos J., Heuzem O., Bauer P. Effects of microballoons concentration on the detonation characteristics of nitromethane — PMMA mixtures // Proc. Ninth Intern. Detonation Symp. — 1989. — P. 362–365.
4. Gois G. C., Campos J., Mendes R. Shock initiation of nitromethane-PMMA mixtures with glass microballoons // Proc. Tenth Intern. Detonation Symp. — 1993. — P. 758–765.
5. Khasainov B. A., Ermolaev B. S., Presles H.-N. Effect of glass microballoons on shock wave sensitivity and detonation critical diameter of condensed explosives // Proc. Tenth Intern. Detonation Symp. — 1993. — P. 40–43.
6. Khasainov B. A., Borisov A. A., Ermolaev B. S., Korotkov A. I. Two-phase visco-plastic model of shock initiation of detonation in high density pressed explosives // Proc. Seventh Intern. Detonation Symp. — 1981. — P. 435–447.
7. Lee J., Sandstrom F. W., Craig B. G., Persson P.-A. Detonation and shock initiation properties of emulsion explosives // Proc. Ninth Intern. Detonation Symp. — 1989. — P. 263–271.
8. Chaudhri M. M., Almgren L.-A., Persson A. Detonation behaviour of a «water-in-oil» type emulsion explosive containing glass microballoons of selected sizes // Proc. Tenth Intern. Detonation Symp. — 1993. — P. 741–748.
9. Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Караханов С. М., Зыков В. В. Критические диаметр и толщина эмульсионного взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 3. — С. 121–127.
10. Сильвестров В. В., Пластинин А. В. Исследование низкоскоростных эмульсионных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 5. — С. 124–133.
11. Пластинин А. В., Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Сильвестров В. В. Критический диаметр низкоскоростного эмульсионного взрывчатого вещества в оболочке // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 6. — С. 107–110.
12. Юношев А. С., Пластинин А. В., Сильвестров В. В. Исследование влияния плотности эмульсионного взрывчатого вещества на ширину зоны реакции // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 79–88.
13. Yoshida M., Iida M., Tanaka K., Fujiwara S. Detonation behavior of emulsion explosives containing glass microballoons // Proc. Eighth Intern. Detonation Symp. — 1985. — P. 993–1000.
14. Lefrancois A., Grouffal J.-V., Bouinot P., Mencacci S. Temperature and pressure measurements comparison of the aluminized emulsion explosives detonation front and products expansion // Proc. Twelfth Intern. Detonation Symp. — 2002. — P. 432–439.
15. Сильвестров В. В., Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Пластинин А. В. Температура детонационного фронта эмульсионного взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 135–142.
16. Mendes R., Ribeiro J., Plaksin I., Campos J., Tavares B. Differences between the detonation behavior of emulsion explosives sensitized with glass or with polymeric microballoons // J. Phys.: Conf. Ser. (2013 Joint APS-SCCM/AIRAPT Conf.). — 2014. — V. 500, N 5. — P. 520–530. — DOI: 10.1088/1742-6596/500/5/052030.
17. Hirosaki Y., Murata K., Kato Y., Itoh S. Detonation characteristics of emulsion explosive as function of void size and volume // Proc. Twelfth Intern. Detonation Symp. — 2002. — P. 263–270.
18. Юношев А. С., Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Рафейчик С. И. Влияние индивидуальных пор на параметры детонации эмульсионного взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 2. — С. 91–97.
19. Бордзиловский С. А., Караханов С. М. Измерение температуры полиметилметакрилата при ударном сжатии // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. физ. — 2011. — № 1. — С. 116–122.

20. **Караханов С. М., Пластинин А. В., Бордзиловский Д. С., Бордзиловский С. А.** Время формирования горячих точек при ударном сжатии микробаллонов в конденсированной среде // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 105–113.
21. **Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Сильвестров В. В.** Оптическое излучение ударно-сжатой эпоксидной смолы со стеклянными микросферами // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 3. — С. 105–112.
22. **Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П., Челышев В. П., Шехтер Б. И.** Физика взрыва. — М.: Наука, 1975.
23. **Акимова Л. Н., Гоголя М. Ф., Галкин В. Н.** Параметры детонации малоплотных конденсированных ВВ // Физика горения и взрыва. — 1978. — Т. 14, № 2. — С. 135–138.
24. **Tanaka K.** Shock compression of solid with voids by gridless Lagrangian SPH // Shock Compression of Condensed Matter — 2005. — AIP Conf. Proc. 1426, pt 2. — P. 1117–1120.

Поступила в редакцию 20/II 2017 г.
